

曹嘉欣, 陈永金, 朱海勇, 等. 黄河三角洲湿地柽柳周边土壤的水盐耦合关系[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 774-787. CAO J X, CHEN Y J, ZHU H Y, et al. Tamarix chinensis on soil water and salt and its coupling relationship in the Yellow River Delta wetland[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 774-787. (in Chinese)

黄河三角洲湿地柽柳周边土壤的水盐耦合关系

曹嘉欣¹, 陈永金¹, 朱海勇³, 李佳欣¹, 王续廷¹, 徐梦辰², 刘加珍¹

(1. 聊城大学地理与环境学院, 山东 聊城 252059; 2. 济南市环境研究院, 济南 250100; 3. 青岛理工大学, 青岛 266520)

摘要: 为揭示滨海湿地植物对土壤水盐的影响机制, 以黄河三角洲湿地柽柳(*Tamarix chinensis* Lour.) 周边土壤水、盐为研究对象, 分析柽柳周边土壤水盐相互影响的耦合关系。结果表明: 距柽柳远近不同, 土壤含水率的差异明显不同, 冠下表层土壤含水率明显大于冠缘和裸地, 呈现由冠下至裸地逐渐减小的趋势, 尤其是柽柳西、南两侧的变化趋势最为明显; 20 cm 土层以上水分聚集率为冠下大于冠缘, 呈现明显的“水岛”效应, 而 20 cm 以下水分聚集率的变化则相反; 土壤盐分表聚性显著, 远离柽柳的裸地表层土壤含盐量较高, 西、南两侧最为明显; 土壤总盐与 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 3 种离子相关性极显著, 这些离子在近柽柳周围土壤的变化幅度及含量均较小, 盐分富集率明显为冠下小于冠缘, 呈现“盐谷”效应; 土壤水盐耦合度在柽柳周边表现为西侧>南侧>北侧>东侧, 水、盐呈显著负相关; 西、南两侧较高的土壤含盐量出现在低含水率的条件下, 呈现高含盐量+低含水率为高耦合度的特征, 这种高耦合度情况还出现在柽柳周边的表层土壤与远离柽柳的裸地。在柽柳的影响下, 水盐耦合度呈现距柽柳由近及远逐步增大、随着土层深度的增加而逐渐减小的趋势。

关键词: 黄河三角洲; 柽柳; 水盐分析; 空间变化; 耦合关系

中图分类号: S156 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0078

水盐时空特征及耦合关系是盐渍化土壤治理和区域生态保护管理的重要基础^[1], 一定程度上反映了盐渍化的程度和状态, 是研究黄河三角洲盐碱地迁移变化及有效改良的依据。为此, 揭示柽柳灌丛周边土壤水盐的耦合关系, 阐明柽柳对滨海湿地盐渍土变迁的影响, 对抑制土壤盐渍化的发展、合理开发滨海湿地资源具有重要意义。水盐之间存在密切关系, 二者的动态受气候、土壤、植被和水文等多种因素的影响^[2-3]。土壤水是土壤盐分的重要载体^[4], 在蒸发过程中, 水携带盐分在土壤中向上迁移, 导致盐分积累^[5]。在内蒙古吉兰泰盐湖不同立地土壤含水率和土壤总含盐量往往随土层深度增加而增加^[6], 在强烈的蒸发作用下表层土壤含盐率往往高于深层土壤^[4,7-9], 尤其在地下水埋深较浅的干旱、半干旱区表现为极强的表聚性, 往往呈“T”型分布^[10-11]。有研究表明, 灌区土壤盐离子及总盐含量受土壤含水率、地下水埋深等影响较小, 盐分含量与水分含

量呈反比^[12], 但盐分也可以增加土壤水分的吸附量^[13]。水-热-盐之间变化往往具有高度的耦合性, 土壤水、热、盐响应关系随着土壤含水率的增加而改善^[14]; 土壤中盐分运动变化趋势同土壤中水分运动的总趋势及土壤温度的变化具有协同性^[15], 土壤的持水性越强、温度变化越剧烈, 土壤中的盐分越大^[16]。

土壤水盐的空间特征对区域植物群落结构及其生长繁衍具有重要影响^[17]。在滨海盐碱地园林绿化过程中, 土壤水分和盐分成为限制树木成活和生长的关键因子^[18], 反之, 植物也是土壤水盐耦合关系的重要影响因素之一。在黄河三角洲, 随着与海洋距离的增大, 表层土壤的含水率、含盐量和水盐耦合度逐步递减^[3]。其中, 土壤表层含水率与含盐量呈显著正相关^[3], 表层盐分积聚受地下水电导率、 Na^+ 、 Cl^- 显著影响^[19]。柽柳(*Tamarix chinensis* Lour.) 是典型的泌盐植物, 在改善滨海湿地土壤性状方面起重要作用^[20]。有研究表明柽柳周围表层土, 具有盐分

收稿日期: 2024-03-08 修回日期: 2024-06-18 网络出版时间: 2024-07-17

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240716.0856.002>

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC15B02; K23LD100; 321021916; CXCXY2022165)

作者简介: 曹嘉欣(2001—), 女, 山东潍坊人, 主要从事湿地环境保护研究。E-mail: 2460530468@qq.com

通信作者: 刘加珍(1974—), 女, 四川遂宁人, 教授, 博士, 主要从事与湿地生态过程相关的科研教学研究。E-mail: 271869320@qq.com

的富集效应,即离植株越近盐分含量越高,且不同离子的富集程度不同^[21],在柽柳基茎周围能形成“盐谷”“碱谷”效应,以 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 最为明显^[7],空间上表现出盐分的“距离效应”等^[8]。综上所述,以往的研究多集中在柽柳对水分或者盐分的影响,而有关柽柳周边水盐关系的研究,尤其是小生境的水盐耦合关系及时空变化的研究仍显不足,因此,本文从柽柳灌丛周边不同方位土壤水盐的分布特征入手,重点分析柽柳周边水盐耦合关系及时空变化特征,揭示黄河三角洲小生境范围柽柳与土壤水盐耦合机制的关系,以为滨海湿地的保护与恢复提供科学参考依据。

1 研究区概况

黄河三角洲(118°33'E~119°20'E, 37°35'N~38°12'N)位于莱州湾和渤海湾之间,是黄河冲积物淤积而成的三角洲平原,行政区划上属东营市管辖^[22]。地势由西南向东北倾斜^[3],属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季气候变化明显,光照充足,年均气

温11.7~12.6℃^[23],年均日照时数2 590~2 830 h,年均降水量530~630 mm,主要集中于7—8月份^[24],地表径流和地下水补给量年内分配极不均匀^[23]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

黄河三角洲地势平坦、土质疏松^[25],故本研究区选在自然保护区南侧地势平坦的缓冲区内,依据柽柳群落的数量调查特征^[26],选择有代表性、人为干扰小,株高接近2 m,冠幅约为3 m×3 m的生长旺盛、形态相似且相对独立的3棵柽柳^[9]。从东、西、南、北4个方向距柽柳根部50、100、150和200 cm处设置土壤剖面(图1),对剖面自下向上分层取样,土层为0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~40 cm,以见到浅层地下水为止,土样装入自封袋带回实验室经自然风干后去除植物残体和石块,过筛备用,共采集土壤样本192个。土壤含水率用铝盒取样、现场称重后带回实验室,采用重量法烘至恒重测得。土壤温度在采样时用国产五支组直角地温计现场测定。

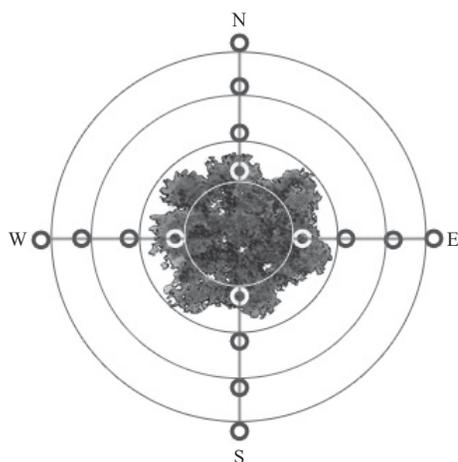


图1 柽柳周边土壤采样点

Fig. 1 Soil sampling points around *Tamarix*

土样过18目筛测定盐分八大离子(HCO_3^- 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}),其中, K^+ 与 Na^+ 采用火焰光度法测定, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 采用EDTA络合滴定, Cl^- 用 AgNO_3 滴定, CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 使用双指示剂滴定法滴定, SO_4^{2-} 用EDTA间接滴定法滴定,详情见土壤农化分析文献^[27]。

2.2 研究方法

(1)水分聚集率与盐分富集率。在富集率计算方法^[8,28]的基础上,提出“水分聚集率与盐分富集率”的计算方法。该方法将柽柳植株周边土壤分为冠

下(距树干50 cm处)、冠缘(距树干150 cm处)、裸地(距树干200 cm处)3种,以裸地为参考,具体计算公式为

$$E_A = A/C \quad (1)$$

$$E_B = B/C \quad (2)$$

式中: E_A 表示冠下的水分或盐分富集率; E_B 表示冠缘的水分或盐分富集率; A 表示冠下含水率或盐分质量分数; B 表示冠缘含水率或盐分质量分数; C 表示裸地含水率或盐分质量分数^[8,28]。

(2)碱化度计算。碱化度计算公式^[29]为

$$E_{SP} = 100(-0.0126 + 0.01475S_{AR}) / [1 + (-0.0126 + 0.01475S_{AR})] \quad (3)$$

$$S_{AR} = C_{Na^+} / [(C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}) / 2]^{1/2} \quad (4)$$

式中: E_{SP} 为碱化度; S_{AR} 为钠吸附比; C_{Na^+} 、 $C_{Ca^{2+}}$ 、 $C_{Mg^{2+}}$ 分别为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的质量分数, g/kg。

(3)耦合度分析。耦合度是描述系统或要素相互影响的程度^[3], 借鉴物理学中的容量耦合 (capacitive coupling) 概念及容量耦合系数模型, 推广得到 n 个系统(或要素)相互作用耦合度模型^[30], 模型如下:

$$C_n = \{(u_1 \cdot u_2 \cdot \dots \cdot u_m) / [\prod (u_i + u_j)]\}^{1/n} \quad (5)$$

由上述模型易得到土壤含水率 W 与含盐量 S 的耦合度函数:

$$C = 2(W \cdot S) / [(W + S)(W + S)]^{1/2} \quad (6)$$

耦合度值 $C \in [0, 1]$ 。当 $C=0$, 耦合度极小, 表示水盐处于无关状态, 称为水盐无序发展^[3]。当 $C=1$, 耦合度最大, 表示水盐之间达到共振耦合。耦合度越大则水盐的有序状态越高, 水盐相互影响的程度越大^[3]。

采用 Excel 和 SPSS 26 软件对相关数据进行统计分析: 用比较平均值法分析研究区土壤水盐时空分异特征; 用 Pearson 相关系数分析土壤含水率、总盐与各种盐离子之间的相关性; 用 Origin 立体三维

俯视图进行耦合度分析。

3 结果与分析

3.1 柽柳周边土壤水分的变化特征

依据图 2 水分变化的色阶, 柽柳周边土壤含水率的变化可分为 3 个等级, 20%~26% 为低阶含水, 26%~33% 为中阶含水, 33%~40% 为高阶含水。从平均值来看: 柽柳周边的土壤含水率表现为南侧<西侧<东侧<北侧; 冠下表层土壤含水率明显大于冠缘和裸地, 呈现由冠下至裸地逐渐减小的水分梯度变化。距柽柳 50~100 cm 处土壤含水率随土层深度的增加而增加, 但在西、南两侧距柽柳 50 cm 的土壤剖面中出现异常变化, 20~30 cm 土层表现为高阶含水层, 这与冠下植被的覆盖和壤下植物根系储水有一定的关系。150 cm 处即冠缘所在的位置, 土壤表层至深层含水率由中阶含水快速变化到高阶含水, 含水率从 28% 变化至深层的 36%, 这种变化以东侧最为明显, 在接近 20 cm 土层深度时土壤含水率已经大于 33%; 而柽柳南侧 150 cm 处含水率并没有较大变化。距柽柳 200 cm 处土壤含水率普遍较低, 土壤剖面呈现低阶至中阶的含水变化特征, 深层土壤含水率低于 30%, 其中西侧土壤含水率最低, 表层土为橙红色的低阶含水区。

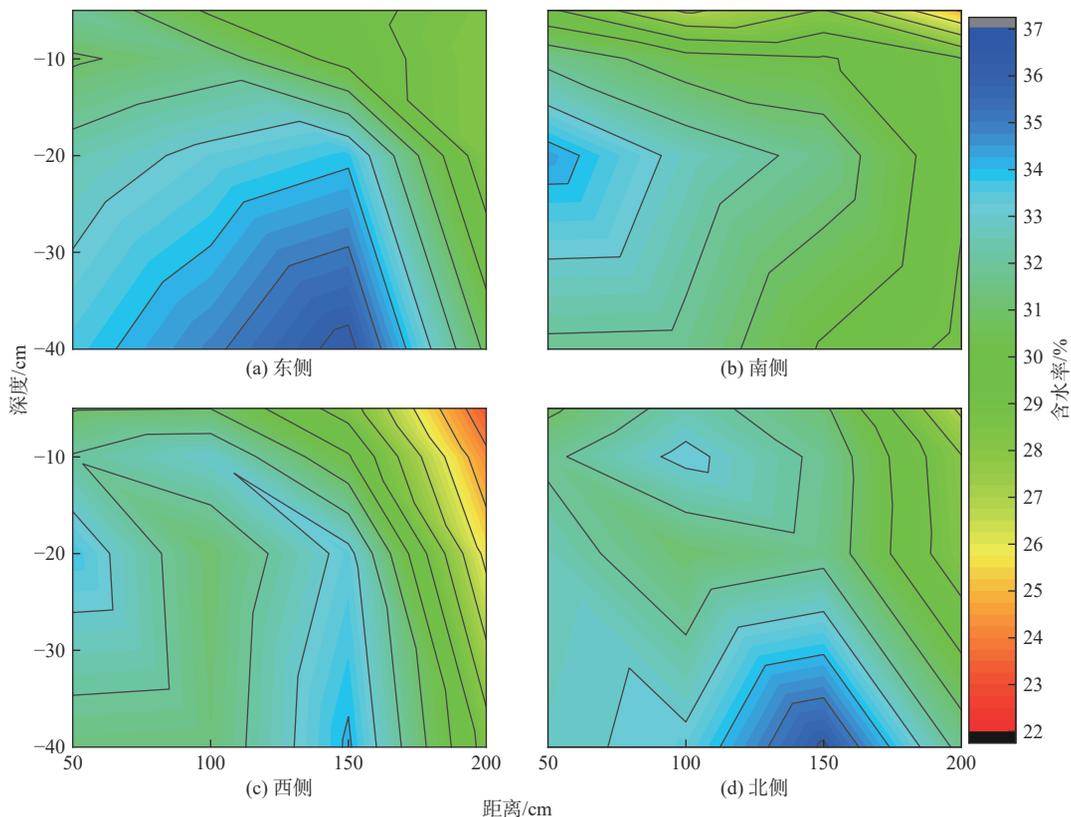


图 2 不同方向土壤含水率趋势变化图

Fig. 2 Trend plot of soil moisture content in different directions

在不同土层深度上冠缘与冠下水分聚集率均大于100%(图3),土层20 cm以上冠下的水分聚集率明显比冠缘处大,20 cm土层以下则相反。其中,10~20 cm土层水分聚集率较高,冠下与冠缘的水分聚集率差值较小,差值最大为0~5 cm、20~40 cm土层。从0~40 cm的水分聚集率平均值看冠下水分聚集率(115.3%)>冠缘水分聚集率(113.9%),表现出明显的“水岛”效应。

3.2 柽柳周边土壤盐分空间变化特征

3.2.1 柽柳周边土壤盐离子的关系特征

从各种盐离子的相关性(表1)来看, HCO_3^- 与总盐及其他离子呈极显著负相关,总盐与 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 的正相关性较大,此3种离子含量的变化与距离呈极显著相关性($P<0.01$),而 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 随距离增加无明显变化,与距离无显著相关($P>0.05$),说明该区域土壤盐分受 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 含

量影响较大,受 SO_4^{2-} 的影响较小。土壤总盐受阳离子影响的大小顺序为 $\text{Na}^+>\text{Mg}^{2+}>\text{Ca}^{2+}>\text{K}^+$,受阴离子影响的大小顺序为 $\text{Cl}^->\text{HCO}_3^->\text{SO}_4^{2-}$ 。从盐离子与土层深度的关系(表1)来看,除 HCO_3^- 含量与土层深度呈极显著正相关之外, Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 均与土层深度呈极显著负相关。

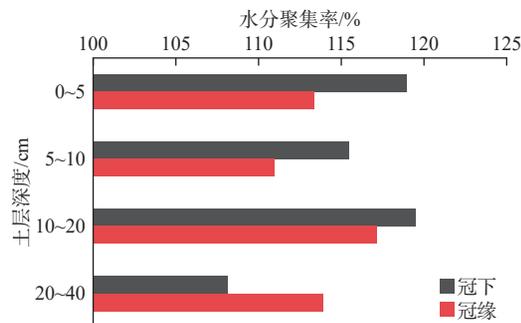


图3 各土层深度水分聚集率

Fig. 3 The water aggregation rate in soil depth

表1 土壤盐分相关性分析($n=192$)

Tab. 1 The correlation analysis among soil salt ions ($n=192$)

因素	TS	HCO_3^-	Cl^-	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	深度	距离
TS	1									
HCO_3^-	-0.522**	1								
Cl^-	0.993**	-0.493**	1							
K^+	0.788**	-0.551**	0.776**	1						
Na^+	0.970**	-0.481**	0.974**	0.797**	1					
Ca^{2+}	0.848**	-0.500**	0.823**	0.661**	0.742**	1				
Mg^{2+}	0.950**	-0.507**	0.942**	0.721**	0.884**	0.889**	1			
SO_4^{2-}	0.459**	-0.332**	0.399**	0.390**	0.330**	0.783**	0.550**	1		
深度	-0.441**	0.356	-0.417**	-0.588**	-0.400**	-0.544**	-0.509**	-0.562**	1	
距离	0.401**	0.019	0.422**	0.185	0.426**	0.209	0.324**	-0.045	0	1

注:**表示在0.01级别(双尾),相关性显著。

从不同方向上看,总盐、 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量均值呈西、南低,东、北高的特征(表2), K^+ 质量分数均值较小,西、南侧含量高于东、北侧,而 Cl^- 含量在各方向均较高,呈现西侧>南侧>北侧>东侧。不同土层间的各离子均值变化差异也较大,表层明显大于深层的有 Cl^- 、 Na^+ ,相差值大于0.3,而 HCO_3^- 、 K^+ 在不同土层间差距较小,表层与深层的差值小于0.003,其中 K^+ 表层高于深层,而 HCO_3^- 表层略小于深层。距柽柳远近不同各离子含量出现水平距离上的变化, Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 的含量随柽柳距离的增加而增加。

由于总盐与 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 的相关性系数较大,

因此进一步分析(图4~6)可得, Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 的变化趋势相似,与200 cm相比,50 cm处的 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 含量在各方向变化幅度均较小且含量较低,尤其是南侧变化幅度最小但含量相对东、北两侧较高,而200 cm处的 Na^+ 、 Cl^- 在南侧变化幅度最大,南侧含量较高且变化幅度明显大于东、西、北侧。3种离子之间变化差异稍有不同,50 cm处 Mg^{2+} 在西侧变化幅度大,而 Na^+ 、 Cl^- 在东侧变化幅度最大,200 cm处 Mg^{2+} 在东侧变化幅度大, Na^+ 、 Cl^- 则在南侧变化幅度最大。3种离子在北方向远近变化幅度差异不明显,在南侧远近变化幅度差异最明显,同一距离3种离子均值含量较高的出现在西侧。

表 2 柽柳周边土壤盐离子含量的平均值

Tab. 2 Average of soil salt ions content around *Tamarix*

%

分类指标	各离子含量均值							
	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	
不同方向	E	0.016	0.696	0.004	0.360	0.055	0.044	0.061
	S	0.015	1.412	0.006	0.711	0.096	0.098	0.068
	W	0.016	1.601	0.006	0.743	0.109	0.105	0.072
	N	0.019	0.867	0.004	0.440	0.043	0.044	0.047
不同土层	0~5 cm	0.015	1.669	0.007	0.776	0.152	0.138	0.127
	5~10 cm	0.016	1.153	0.005	0.583	0.057	0.066	0.039
	10~20 cm	0.018	0.895	0.004	0.458	0.047	0.046	0.042
	20~40 cm	0.017	0.858	0.004	0.437	0.047	0.042	0.041
不同距离	50 cm	0.017	0.634	0.004	0.328	0.047	0.032	0.058
	100 cm	0.016	1.070	0.005	0.538	0.082	0.072	0.079
	150 cm	0.016	1.462	0.005	0.711	0.085	0.098	0.050
	200 cm	0.017	1.410	0.005	0.676	0.088	0.089	0.061

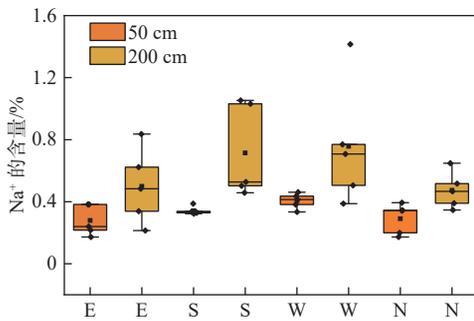


图 4 距柽柳不同距离 Na⁺ 的含量

Fig. 4 Characteristics of Na⁺ content at different distances from *Tamarix*

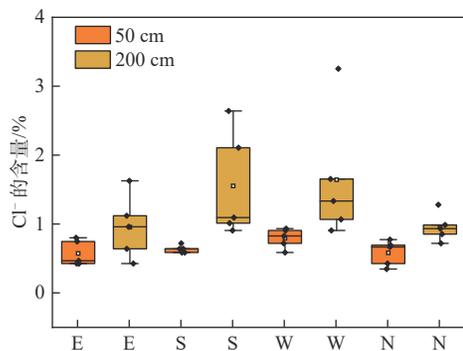


图 5 距柽柳不同距离 Cl⁻ 的含量

Fig. 5 Characteristics of Cl⁻ content at different distances from *Tamarix*

分随土层深度的增加而增加, 远离柽柳 200 cm 处盐分随土层深度的增加而减小; 在水平距离上表层土壤盐分随着距柽柳距离的增加而增大, 盐分从低盐梯度水平变化至中等含盐梯度。南侧与西侧含盐远离柽柳 100 cm 之外的表层和深层均是中、高阶盐分梯度水平, 仅仅在近柽柳 50~100 cm 范围的 30 cm 以下土壤中表现为低盐梯度。北侧距柽柳 150 cm 内土壤总盐无明显梯度变化, 仅在 10~30 cm 的土层处呈现盐分低谷, 距柽柳 150 cm 之外的土壤总盐随深度增加而减少。

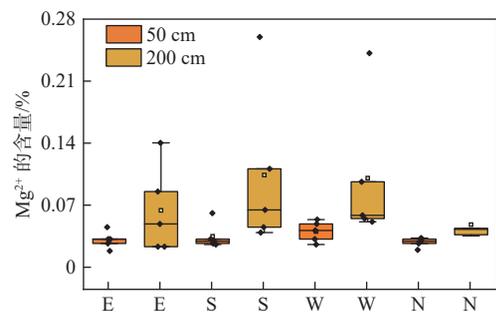


图 6 距柽柳不同距离 Mg²⁺ 的含量

Fig. 6 Characteristics of Mg²⁺ content at different distances from *Tamarix*

3.2.2 柽柳灌丛周边总盐含量的空间变化特征

如图 7 所示, 柽柳周边土壤含盐率的变化可分为 3 个梯度水平, 0.5%~1.5% 为低盐梯度, 1.5%~4.3% 为中盐梯度, 4.3%~5.3% 为高盐梯度。不同方向按土壤总盐均值大小的顺序为东侧(1.235%)<北侧(1.463%)<南侧(2.407%)<西侧(2.652%)。其中: 东侧含盐属于低阶盐分水平, 距柽柳 100 cm 范围盐

从盐分富集率(图 8)看出: 冠下富集率明显低于冠缘, 随着土壤深度的增加而增大, 增大幅度约 40%; 冠缘富集率随土壤深度变化增加幅度不明显, 盐分富集率多在 100% 左右, 变化范围为 97%~117%, 由此可见柽柳灌丛岛周边的盐分在柽柳的影响下会表现出明显的“盐谷”效应。

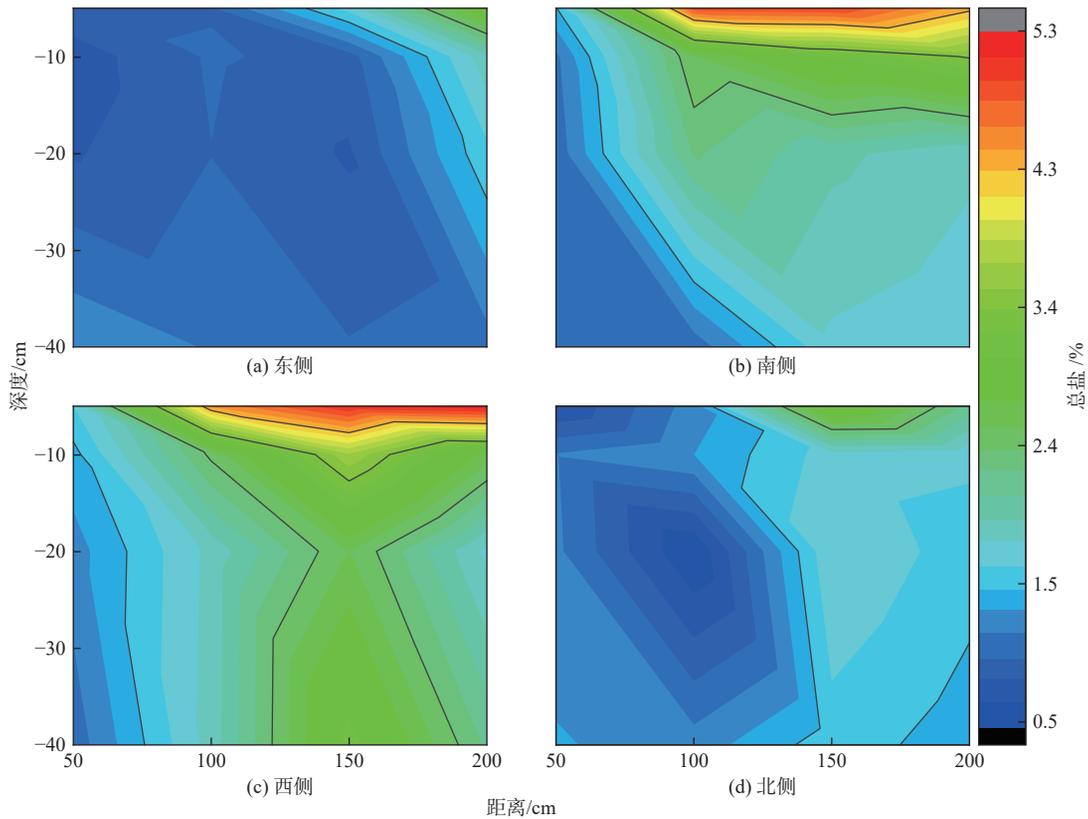


图7 不同方向土壤总盐剖面图

Fig. 7 Distribution profiles of soil total salt in different directions

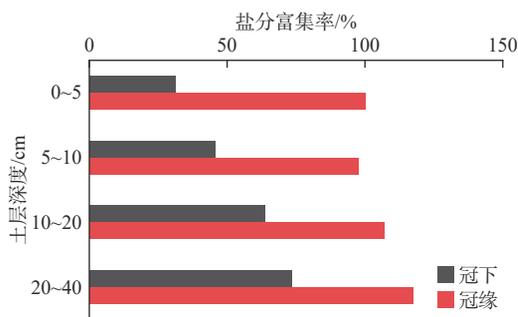


图8 各土层深度盐分富集率

Fig. 8 The salt enrichment rate of soil depth

3.3 土壤水盐耦合的关系分析

3.3.1 不同方向上的土壤水盐耦合

由回归分析(表3)可知,东、南、西、北各方向水与盐关系为负相关关系,其中,南侧具有极显著负相关关系,西、北两侧无显著相关关系。回归分析表明,东侧与南侧水盐关系密切,东侧水盐关系为二次函数($R^2=0.540, P<0.01$),南侧水盐的变化趋势为线性水盐关系模型($R^2=0.553, P<0.01$),说明东侧土壤含水率和盐分之间存在“U”形变化趋势,也就是说在低含水率和高含水率都易形成较高含盐量。从水盐耦合度的关系(图9~12)看:东侧土壤含水率低于32%、含盐量高于2.0%时水盐耦合度较大;南侧则表现为随着含水率增加含盐量逐渐降低、水盐

耦合度也呈逐渐降低的趋势;西侧水盐耦合度普遍较高,但水盐的回归分析没有密切的变化趋势(表3);北侧含盐量高于2.0%、含水率在28%~32%土壤水盐耦合度较高。从水盐耦合度的平均值来看,各方向的耦合度大小顺序为西侧>南侧>北侧>东侧。

表3 不同方向水盐相关及回归分析($n=192$)

Tab. 3 Water-salt regression analysis in different directions

方向	回归方程	决定系数 R^2	显著性 P	Pearson相关系数
E	$Y=0.048X^2-3.199X+53.849$	0.540	0.006	-0.547*
S	$Y=-0.436X+15.497$	0.553	0.001	-0.743**
W	$Y=(134.778/X)-1.877$	0.168	0.115	-0.402
N	$Y=0.018X^2-1.195X+20.989$	0.112	0.463	-0.247

注:**表示在0.01级别(双尾),相关性显著;*表示在0.05级别(双尾),相关性显著。

3.3.2 不同深度的土壤水盐耦合

由表4可知,各土层水盐关系呈负相关关系,土壤含盐量随含水率的增加而降低,但仅在0~5 cm土层的负相关关系极显著。回归分析显示表层土壤含水率与含盐量之间存在较好的线性关系($R^2=0.409, p<0.01$),表现为土壤含盐量随含水率的增加而降低,而其他土层的水盐之间没有明显的变化关系。从水盐耦合度(图13~16)来看,0~20 cm土层耦合度的

最低值出现在含水率约为 31%。表层土壤的水盐耦合度(图 13)随着含盐量的增加而增大,尤其是含盐量大于 2.0%、含水率为 24%~32% 的范围水盐耦合度均较大,而含盐量低于 2.0% 时耦合度随着含盐量的降低逐渐减小,在含水率约为 31% 时耦合度降为最低。5~10 cm、10~20 cm 水盐耦合度的变化趋势与土壤表层相似(图 14、15),但水盐之间无明显的线性关系(表 4); 20~40 cm 土壤耦合度随着含水率与含盐量的降低而降低(图 16)。从水盐耦合度均值来看, 0.541(0~5 cm)>0.459(5~10 cm)>0.406(10~20 cm)>0.403(20~40 cm)。

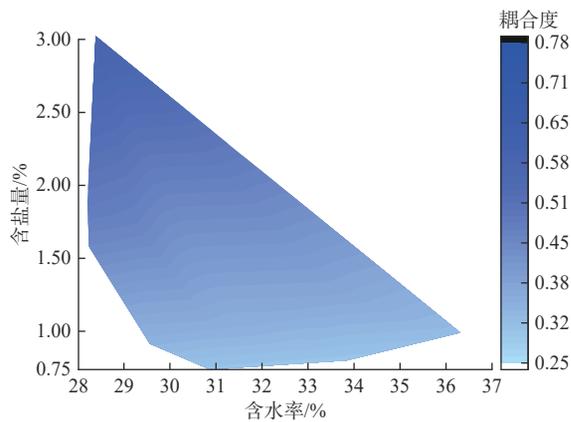


图 9 东侧土壤水盐耦合度

Fig. 9 Coupling of soil water and salt on the east

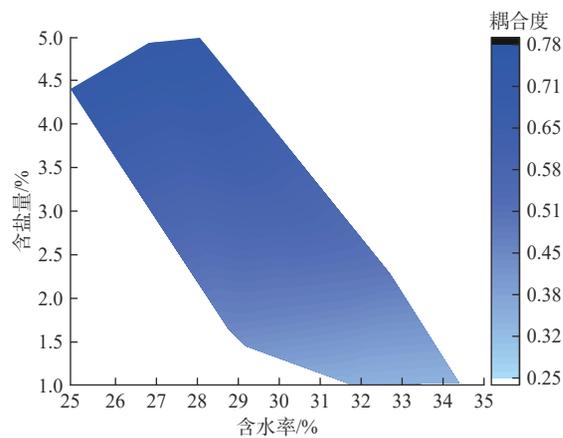


图 10 南侧土壤水盐耦合度

Fig. 10 Coupling of soil water and salt on the south

3.3.3 不同距离上的土壤水盐耦合

从怪柳周边不同距离的水盐关系(表 5)来看,不同距离上水盐之间呈负相关关系,距离怪柳越远负相关关系越显著,在距离怪柳 200 cm 处 Pearson 相关系数为-0.697。回归分析显示:距怪柳 100 cm、150 cm 处的土壤水盐关系呈线性关系($R^2=0.326$, $P<0.05$; $R^2=0.286$, $P<0.05$),含盐量随含水率的增加而减少;距怪柳 50 cm 水盐回归无显著的相关关系;

在 200 cm 处则表现为含水率与含盐量的二次函数关系($R^2=0.543$, $P<0.01$),其中在含水率小于 30% 时,含盐量随含水率的增加而迅速降低,当含盐量降低到低于 2.0% 时,随着含水率的增加而呈缓慢降低趋势。从水盐耦合度的关系(图 17~20)看,各距离的耦合度均值大小顺序为 0.359 2(50 cm)<0.434 3(100 cm)<0.494 5(150 cm)<0.521 6(200 cm),随着距离的增加耦合度增大。其中:距怪柳 50 cm 的冠下土壤水盐耦合度较低,最低值在含水率接近 31% 时呈现(图 17); 100 cm 处在含盐量高于 2.0%、含水率低于 32% 时水盐耦合度较大(图 18),耦合度最小值出现在含水率 31% 时; 150 cm、200 cm 水盐耦合度的变化相似(图 19、20),水盐耦合度随着含水率增加、含盐量降低呈降低的趋势。

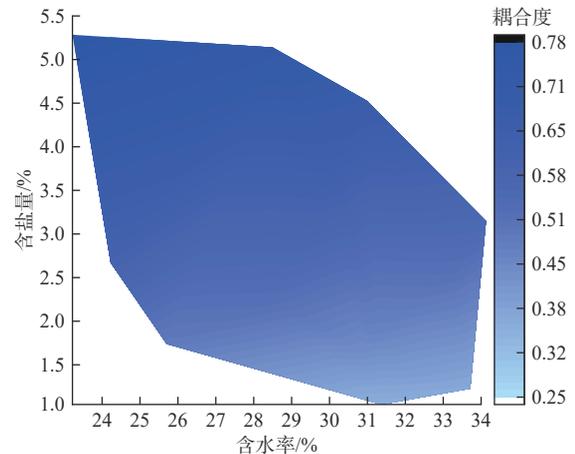


图 11 西侧土壤水盐耦合度

Fig. 11 Coupling of soil water and salt on the west

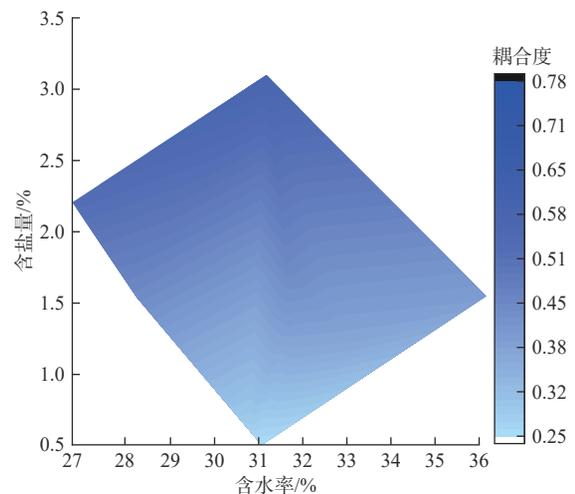


图 12 北侧土壤水盐耦合度

Fig. 12 Coupling of soil water and salt on the north

4 讨论

4.1 怪柳周边的含水率变化与“水岛”效应
有研究表明,表层土壤受土壤温度、植被蒸腾

和土壤蒸发、太阳辐射、降雨等因素的影响使土壤含水率通常较低^[31-32],本文柽柳周边土壤含水率的变化为 20%~26% 的低阶、26%~33% 的中阶、33%~40% 的高阶含水 3 个等级,而表层都在 33% 以下的中、低阶较低的土壤含水状态。但冠下西、南两侧土壤剖面 20~30 cm 土层土壤含水率大于 33% 的异常变化,这是因为植物根系的吸附作用,根系分布层土壤含水量会高于其他土层^[33],故西、南两侧 20~30 cm 土层高含水率的变异与冠下植被的覆盖和壤下植物根系储水有一定的关系。由于深层土壤水分稳定性较高^[34-35],本文 40 cm 以下的土层含水率为大于 30% 的较稳定状态。

表 4 不同深度水盐回归及相关分析($n=192$)Tab. 4 Water-salt regression analysis in different depths ($n=192$)

深度/cm	回归方程	决定系数 R^2	显著性 P	Pearson 相关系数
$\geq 0 \sim < 5$	$Y = -0.434X + 15.452$	0.409	0.008	-0.640**
$\geq 5 \sim < 10$	$Y = -0.012X^2 + 0.565X - 3.850$	0.134	0.393	-0.354
$\geq 10 \sim < 20$	$\ln(Y) = \ln(6.163) - 0.048X$	0.071	0.320	-0.223
$\geq 20 \sim \leq 40$	$Y = 0.020X^2 - 1.331X + 23.605$	0.064	0.651	-0.152

注:**表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

表 5 不同距离水盐回归及相关分析($n=192$)Tab. 5 Water-salt regression analysis in different distances ($n=192$)

距离/cm	回归方程	决定系数 R^2	显著性 P	Pearson 相关系数
50	$Y = 0.029X^2 - 1.871X + 31.023$	0.064	0.651	-0.020
100	$Y = -0.393X + 14.333$	0.326	0.021	-0.571*
150	$Y = -0.282X + 11.354$	0.286	0.033	-0.535*
200	$Y = 0.046X^2 - 2.864X + 46.199$	0.543	0.006	-0.697**

注:**表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著;*表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

表 6 柽柳周边方向、深度和距离对土壤水、盐及其耦合度影响的方差分析

Tab. 6 Analysis of variance of the effects of peripheral orientation, depth and distance on soil water, salt and their coupling degree

变异指标	含水率		含盐量		水盐耦合度	
	F	P	F	P	F	P
方向	1.459	0.235	6.997	**	7.810	**
深度	5.855	**	6.163	**	5.368	**
距离	15.706	**	4.782	**	7.120	**

注:**表示极显著($P < 0.01$)。

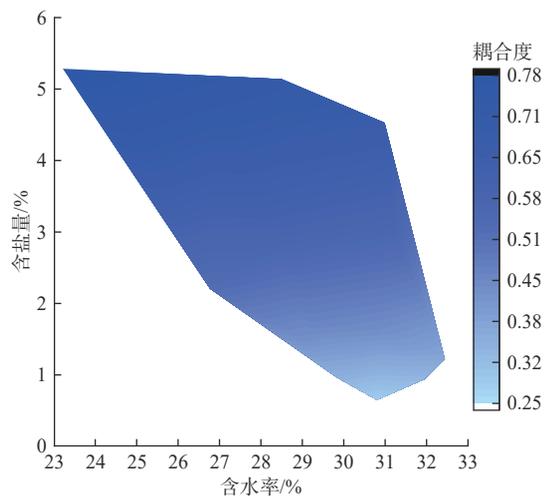


图 13 0~5 cm 土层耦合度

Fig. 13 Coupling of 0-5 cm soil layer

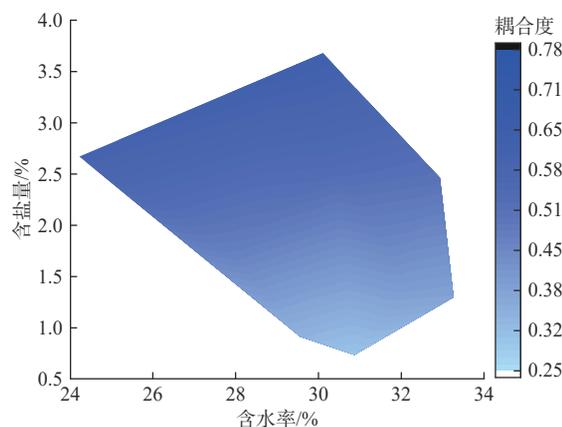


图 14 5~10 cm 土层耦合度

Fig. 14 Coupling of 5-10 cm soil layer

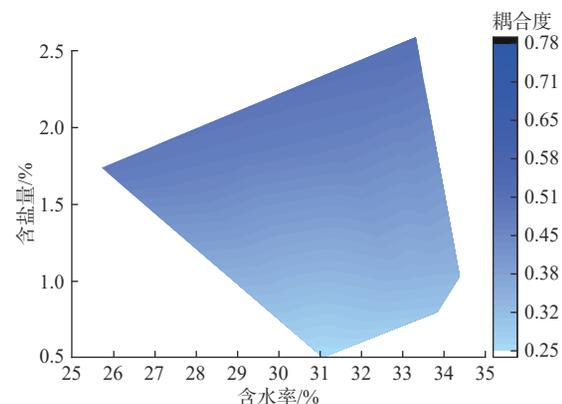


图 15 10~20 cm 土层耦合度

Fig. 15 Coupling of 10-20 cm soil layer

土壤水分含量与蒸发、蒸腾、太阳辐射及植被状况等因素密切相关,大气辐射使地面增温,冠下蒸腾作用使湿度增加而导致大气逆辐射增加,则地面有效辐射(地面放射辐射与地面吸收的大气逆辐射差值)将减小^[32],土壤蒸发作用减弱,故本文冠下表层土壤含水率明显大于冠缘和裸地,呈现由冠下

至裸地逐渐减小的水分梯度变化。柽柳南侧接受的太阳辐射较大,其蒸腾作用能促进土壤水分的运移,有效抑制周围表层土壤水分的蒸发^[36],加之冠层遮挡使风速下降在一定程度上有助于抑制土壤水分的蒸发损失^[32],从而柽柳西、南两侧冠下至裸地水分变化梯度最为明显。

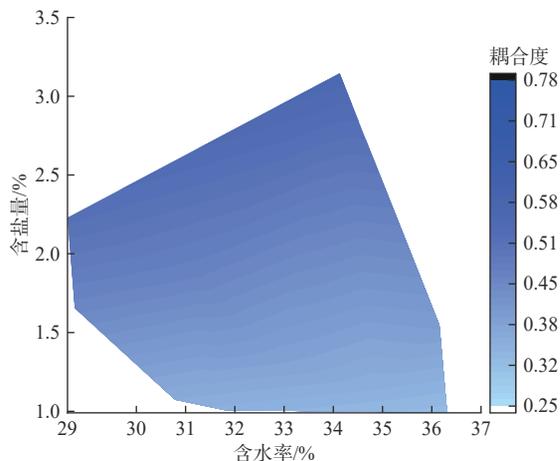


图 16 20~40 cm 土层耦合度
Fig. 16 Coupling of 20-40 cm soil layer

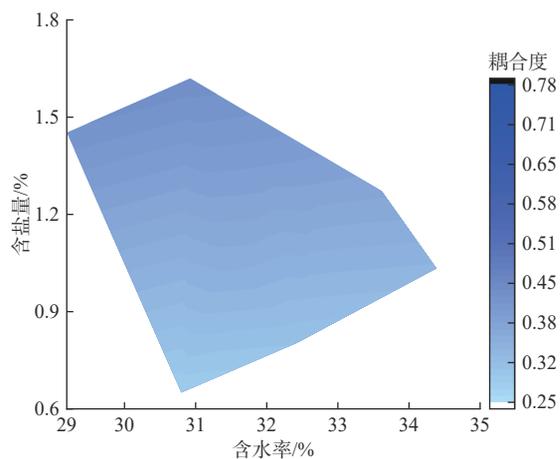


图 17 50 cm 水盐耦合度
Fig. 17 50 cm soil water-salt coupling degree

太阳辐射能引起地表温度变化,通常低温能有效防止土壤蒸散损耗,增强土壤蓄水保水作用^[32]。柽柳冠下、冠缘、裸地的平均土壤温度分别为 31.688 °C、32.559 °C、33.237 °C,正午裸地的温度高达 40 °C 以上,远大于冠下与冠缘,表现为冠下<冠缘<裸地(图 21)。土壤水来自降水,由于冠层对地表的遮蔽,水分没有过快地损失,且受到蒸发作用而发生富集^[36-37],所以柽柳冠下水分聚集率(115.3%)>冠缘水分聚集率(113.9%),表现出明显的“水岛”效应。浅、中层土壤受到土壤蒸发和植被蒸腾双重作用的影响较大^[38],土壤蒸发随土层深度的增加而

降低,深层土壤蒸发减小,有助于土壤含水量的保持^[33]。故本文土层 20 cm 以上冠下的水分聚集率明显比冠缘处大,20 cm 土层以下则相反。

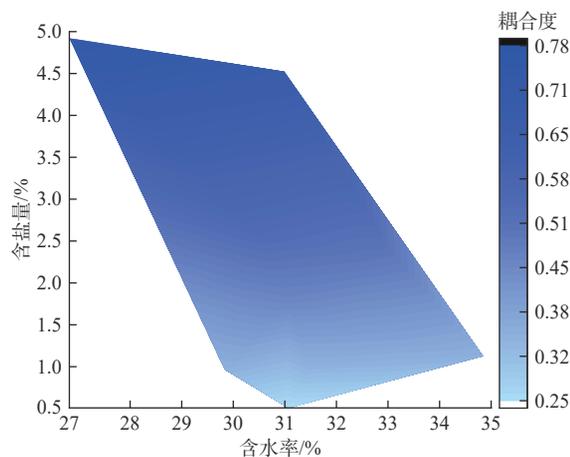


图 18 100 cm 水盐耦合度
Fig. 18 100cm soil water-salt coupling degree

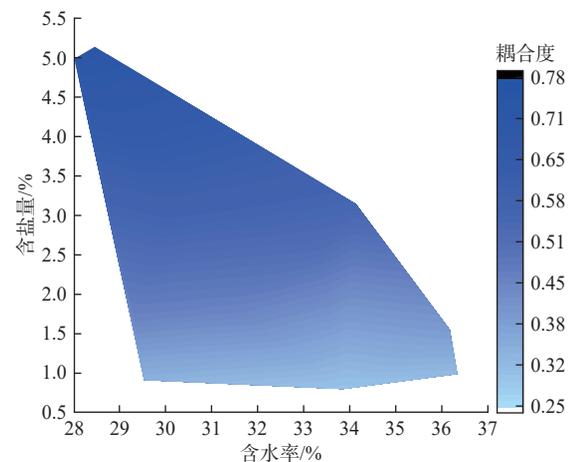


图 19 150 cm 水盐耦合度
Fig. 19 150 cm soil water-salt coupling degree

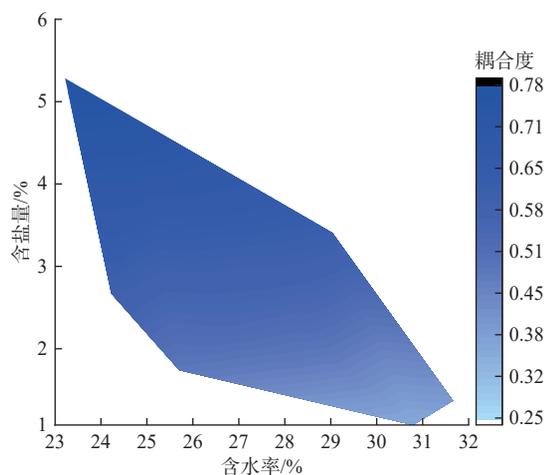


图 20 200 cm 水盐耦合度
Fig. 20 200 cm soil water-salt coupling degree

4.2 柽柳灌丛周边“盐谷”效应及影响因素

本文区域土壤盐分受 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 含量影响

较大,受 SO_4^{2-} 的影响较小。土壤总盐受阳离子影响的大小顺序为 $\text{Na}^+>\text{Mg}^{2+}>\text{Ca}^{2+}>\text{K}^+$,受阴离子影响的大小顺序为 $\text{Cl}^->\text{HCO}_3^->\text{SO}_4^{2-}$ 。在整个土壤剖面中,所有离子均与总盐表现出较好的相关性,其中相关性较强的阴阳离子为 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} ,与许婕等^[7]的研究结果相同。与200 cm相比,50 cm处的 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 含量在各方向变化幅度均较小且含量较低。这是因为柽柳在生长过程中吸收了大量的 Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,通过盐腺细胞向外分泌^[39]。

降水淋溶、盐离子迁移速率的差别和各土层中不同生物量根系对盐分吸收的差异是造成盐分在空间上含量变化的相关因素^[21]。本文将柽柳周边土壤含盐率分为 $<1.5\%$ 、 $1.5\% \sim 4.3\%$ 、 $>4.3\%$ 3个梯度水平,靠近柽柳的地方表层土壤含盐量均为 $<1.5\%$ 的低阶含盐水平,远离柽柳的裸地表层土壤含盐则为中、高含盐水平,尤其是西侧与南侧最为明显,表层土壤距柽柳由近及远从低含盐梯度水平变化至高含盐梯度,这种距柽柳远近空间差异的盐分变化与柽柳根系对盐分的吸收^[40]以及海陆风和太阳辐射有关^[7],地下水中的盐分随毛管水上升到地表并不断积聚,土壤盐分普遍表现为表聚性^[7]。柽柳西、南方向50 cm范围内及东、北方向100 cm范围内均为低含盐梯度,表现出“盐谷”效应,这与雷金银等^[40]的研究一致,从盐分富集率来看,冠下富集率随着土壤深度的增加增大幅度约40%;而冠缘富集率随土壤深度变化增加幅度不明显,原因为柽柳的泌盐作用^[41]使得来自根部的盐分伴随着植物的蒸腾作用而散失掉,从而降低冠下的盐分^[42]。土壤盐分的区化特征缘于植物对盐分的选择吸收速率与离子运输速率的不同,当吸收速率大于运输速率盐分含量即降低^[40]。

4.3 柽柳灌丛周边水盐的耦合效应及影响因素

土壤水、盐含量受多重因素影响,灌溉、蒸发以及地下水埋深等都会影响土壤中的水分与盐分的耦合关系^[12],包括研究区的总体地势也能影响水盐耦合的时空分布态势^[43]。本文柽柳不同方向上水盐耦合度表现为西侧 $>$ 南侧 $>$ 北侧 $>$ 东侧,这可能与该区域地势大致为西南高东北低有关。本文东、北两侧土壤含水率低于32%、含盐量高于2.0%时水盐耦合度较大,而西、南两侧表现为随着含水率增加含盐量逐渐降低、水盐耦合度也呈逐渐降低的趋势,在含盐量高于2.0%时耦合度已远远高于东、北两

侧,究其原因可以发现虽然土壤水分的运移和蒸发是导致土壤盐分变化的主要因素,但含盐梯度也制约水分的运移^[44],本文中的西、南两侧较高的土壤含盐量恰恰出现在低含水率的条件下,土壤水盐呈显著负相关关系,这也印证了李小刚^[13]提出的盐分能显著地降低土壤水势的研究。

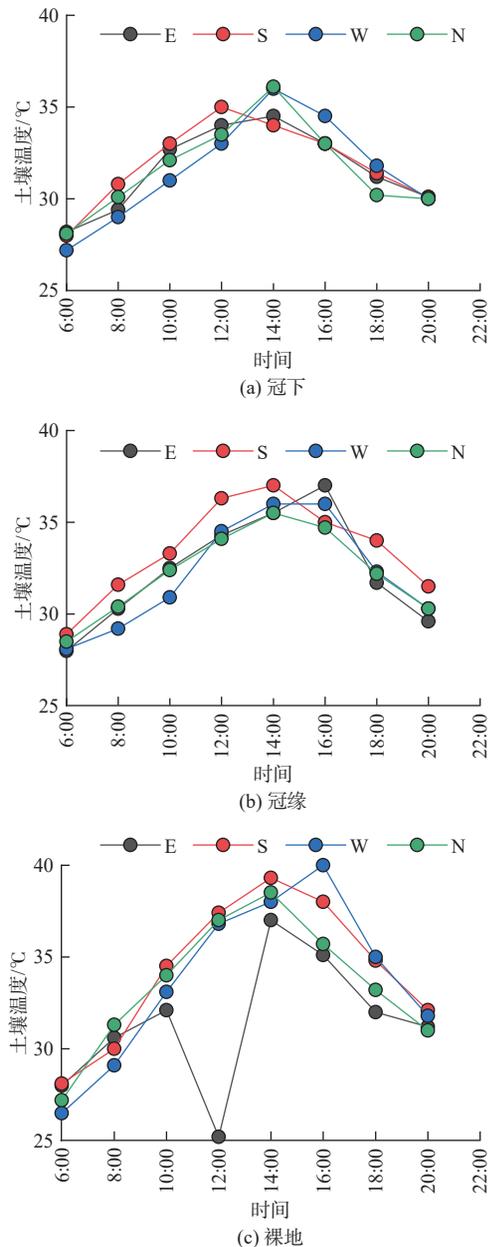


图 21 表层土壤温度日变化

Fig. 21 The temperature diurnal variation of surface soil

植被类型对水盐含量及其耦合度高低也有显著的影响^[1],空间距离上的变化同样影响水盐耦合的大小。有研究^[1]表明由近海到内陆,土壤表层含水量、含盐量以及水盐耦合度呈现逐步递减的趋势。本文距柽柳由远及近水盐耦合度也呈逐步递减的趋势,距离柽柳越近耦合度越小,土壤水盐越向无序性发展,这是因为土壤水盐因子与植物存在相关

关系^[45],高覆盖度较强的植物蒸腾作用减弱了地面蒸发,有效减缓了盐分随水向表层的聚集和运移^[46]。土壤表层水分在毛管作用下得以补充,形成“盐随水来、盐高水多”的同向耦合^[47]。因此本文不同土层、相同含水率的条件下土壤的水盐耦合度随着含盐量的增加而增大,表层水盐耦合度明显大于其他土层,说明表层水盐相互影响程度最大,随着土层深度的增加,外界因素的影响逐渐减弱,耦合度随土层深度的增加而减小。

怪柳对周边土壤含水、含盐以及水盐耦合都有明显的影响。如表 6 所示,其周边不同距离、不同深度上的土壤含水率、含盐量以及水盐耦合均存在极显著的差异,除含水率之外土壤含盐量和水盐耦合度在不同方向上的差异也较明显,这与柳菲等^[48]研究的土壤含盐量的空间依赖性大于土壤含水率有关。有研究^[3]表明,黄河三角洲的近海缓冲区、荒草地及光板地水盐含量均较高的情况下以及近内陆缓冲区、耕地土壤水盐含量均较低情况下,其水盐耦合度都较高。本文怪柳周边则是在高含盐量和低含水率的情况下水盐耦合度较高,这种高耦合度情况出现在怪柳的周边表层土壤、西南两侧以及远离怪柳的裸地。

5 结论

(1)怪柳周边土壤表层含水率易受外界因素影响而比深层含水率低。西、南两侧 20~30 cm 土层高含水率的变异与冠下植被的覆盖和壤下植物根系储水有一定的关系。冠下表层土壤含水率明显大于冠缘和裸地,呈现由冠下至裸地逐渐减小的水分梯度变化,其西、南两侧最为明显。由于较小的蒸发作用及冠幅对太阳直射的阻挡怪柳冠下水分聚集率>冠缘水分聚集率,表现出明显的“水岛”效应;其中,20 cm 土层以上冠下的水分聚集率明显大于冠缘,而 20 cm 以下土层则相反。

(2)土壤总盐受阳离子影响的大小顺序为 $\text{Na}^+>\text{Mg}^{2+}>\text{Ca}^{2+}>\text{K}^+$,受阴离子影响的大小顺序为 $\text{Cl}^->\text{HCO}_3^->\text{SO}_4^{2-}$,其中相关性较强的阴阳离子为 Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} ,此 3 种离子在近怪柳处的变化幅度及含量均较小。远离怪柳的裸地表层土壤含盐量较高,尤其西、南两侧最为明显,表现为明显的表聚性,怪柳西、南方向 50 cm 范围内及东、北方向 100 cm 范围内均为低含盐梯度,表现为“盐谷”效应。冠下富集率随着土壤深度的增加而增大,而冠缘富集率随

土壤深度变化增加幅度不明显,冠下盐分富集率<冠缘盐分富集率。

(3)怪柳不同方向水盐耦合度排序为西侧>南侧>北侧>东侧,深度上随土层深度的增加水盐耦合度减小,距离上距怪柳由远及近水盐耦合度也呈逐步递减的趋势。怪柳周边在高含盐量和低含水率的情况下水盐耦合度较高,这种高耦合度情况出现在怪柳的周边表层土壤,西、南两侧,以及远离怪柳的裸地。

参考文献:

- [1] 张术伟,常春艳,王卓然,等.基于卫星遥感的黄三角滨海区土壤水盐及其耦合关系时空分析[J].*农业资源与环境学报*,2023,40(4):792-804. DOI: 10.13254/j.jare.2022.0614.
- [2] CHAMAKI S, TAGHVAVELAN S, ZHANG H L, et al. Soil salinity variations in an irrigation scheme during a period of extreme dry and wet cycles[J]. *Soil Systems*, 2019, 3(2): 35-50. DOI: 10.3390/soilsystems3020035.
- [3] 张术伟,王卓然,常春艳,等.黄三角滨海区土壤水盐时空分异特征及耦合关系分析[J].*水土保持学报*,2022,36(4):299-308. DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.037.
- [4] 马贵仁,屈忠义,王丽萍,等.基于 ArcGIS 空间插值的河套灌区土壤水盐运移规律与地下水动态研究[J].*水土保持学报*,2021,35(4):208-216. DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.029.
- [5] ZHANG X D, YE P, WU Y J, et al. Experimental study on simultaneous heat-water-salt migration of bare soil subjected to evaporation[J]. *Journal of Hydrology*. 2022, 609: 127710. DOI:10.1016/J.JHYDROL.2022.127710.
- [6] 冯亚亚.荒漠盐湖区防护林体系土壤水盐分布及其对植物群落的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022. DOI:10.27229/d.cnki.gnmnu.2021.000454.
- [7] 许婕,刘加珍,张天举,等.黄河口湿地怪柳灌丛土壤盐渍化特征[J].*生态学报*,2022,42(17):7118-7127. DOI:10.5846/stxb202108172276 DOI: 10.5846/stxb202108172276.
- [8] 陈永金,刘加珍,靖淑慧,等.黄河三角洲湿地怪柳冠下“肥岛/谷”现象研究[J].*聊城大学学报(自然科学版)*,2018,31(1):56-64. DOI: 10.19728/j.issn1672-6634.2018.01.009.
- [9] 马笑丹,刘加珍,陈永金,等.黄河三角洲怪柳周边土壤钠吸附比分布特征及影响因素分析[J].*土壤通报*,2022,53(6):1350-1359. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2021092605.

- [10] AYARS J E, CHRISTEN E W, HOMBUCKLE J W. Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 86: 128-139. DOI: 10.1016/j.agwat.2006.07.004.
- [11] 郝远远, 徐旭, 黄权中, 等. 土壤水盐与玉米产量对地下水埋深及灌溉响应模拟 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 128-136. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.20.016.
- [12] 李娜, 岳卫峰, 龚培昌, 等. 干旱灌区农田土壤水盐分布特征及其对地下水响应 [J]. *节水灌溉*, 2022(1): 7-13. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2022.01.002.
- [13] 李小刚. 含盐量对土壤的水汽吸附及土壤水能量状态的影响 [J]. *土壤通报*, 2001(6): 245-249. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2001.06.002.
- [14] HOU R J, LI T X, FU Q, et al. Research on the distribution of soil water, heat, salt and their response mechanisms under freezing conditions[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 196: 104486-104486. DOI: 10.1016/j.still.2019.104486.
- [15] 由国栋, 虎胆·吐马尔白, 邵丽盼·卡尔江, 等. 膜下滴灌棉田冻融期土壤水分盐分变化特征 [J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(4): 124-128. DOI: 10.7606/j.issn.1000-7601.2017.04.19.
- [16] JAMALI A, JALILI S. Experimental and numerical study on water-filled doubly layered cylindrical shells subjected to lateral impact[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 279: 114617. DOI:10.1016/J.OCEANENG.2023.114617.
- [17] HE B, CAI Y L, RAN W R, et al. Spatiotemporal heterogeneity of soil salinity after the establishment of vegetation on a coastal saline field [J] *Catena*, 2015, 127: 129-134. DOI:10.1016/j.catena.2014.12.028.
- [18] 何斌, 蔡永立, 冉雯瑞, 等. 人工植被对崇明东滩滨海盐土水盐空间异质性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(8): 2151-2158. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2013.0371.
- [19] 吕真真, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化与地下水特征关系研究 [J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1377-1385. DOI: 10.11766/trxb201701160401.
- [20] 夏江宝, 赵西梅, 刘俊华, 等. 黄河三角洲莱州湾湿地柽柳种群分布特征及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4801-4808. DOI: 10.5846/stxb201501090067.
- [21] 张立华, 陈沛海, 李健, 等. 黄河三角洲柽柳植株周围土壤盐分离子的分布 [J]. *生态学报*, 2016, 36(18): 5741-5749. DOI: 10.5846/stxb201504230839.
- [22] 付腾飞, 张颖, 高金尉, 等. 黄河三角洲土壤盐分时空变异特征研究 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(10): 50-60. DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20160476.
- [23] 张天举, 陈永金, 刘加珍. 黄河口湿地不同植物群落土壤盐分与养分分布特征 [J]. *土壤*, 2020, 52(1): 180-187. DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.01.026.
- [24] 张天举, 陈永金, 刘加珍. 黄河三角洲湿地不同植物群落土壤盐分分布特征 [J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(11): 1915-1924. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1524.2018.11.15.
- [25] 孔凡彪. 黄河三角洲潮滩表层沉积物粒度特征及其动力沉积分析 [D]. 济南: 山东师范大学, 2024. DOI: 10.27280/d.cnki.gdsu.2023.000006.
- [26] 徐梦辰. 黄河三角洲湿地柽柳种群分布格局及其肥岛效应研究 [D]. 聊城: 聊城大学, 2017.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [28] 张立华, 陈小兵. 盐碱地柽柳“盐岛”和“肥岛”效应及其碳氮磷生态化学计量学特征 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 653-658. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20150106.008.
- [29] 金梦野, 黄娟, 侯嫫, 等. 三种环境材料及其复合施用对盐碱化土壤的改良效果研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(1): 118-124. DOI: 10.11654/jaes.2019-0880.
- [30] VALERIE I. The Penguin Dictionary of Physics[M]. Beijing: Foreign Language Press, 1996: 92-93.
- [31] 徐鑫, 张金珠, 李宝珠, 等. 不同盐度土壤水盐时空分布特征及对棉花出苗的影响 [J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2022, 40(2): 204-212. DOI: 10.13880/j.cnki.65-1174/n.2022.21.004.
- [32] 刘敏, 高铭雨, 郑恩, 等. 陕北黄土区山地苹果园土壤水分动态变化特征研究 [J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(1): 26-34. DOI: 10.13876/J.cnki.ydnse.230074.
- [33] 孙琰蕙, 张定海, 吴贤忠, 等. 古尔班通古特沙漠东南部不同类型沙丘土壤水分与地形-植被因子关系 [J]. *水土保持研究*, 2024, 31(1): 70-78. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.035.
- [34] 陈斌, 鲁延芳, 占玉芳, 等. 荒漠绿洲过渡带土壤水分空间分布特征及对植被的影响 [J]. *西北林学院学报*, 2023, 38(2): 25-32. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2023.02.04.
- [35] 董金义, 罗敏, 孟凡浩, 等. 蒙古高原土壤水分时空演变格局演变特征分析 [J]. *水土保持研究*, 2024, 31(2): 110-121. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.001.
- [36] 杨煦, 朱勤, 马萌辰, 等. 不同类型盐荒地蒸发能力与水盐变化特征研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2019, 443(9): 49-53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2019.09.010.

- [37] 刘雨, 高光耀, 王棣, 等. 不同疏伐强度下黄土丘陵区刺槐林的水分利用特征 [J]. *生态学报*, 2023, 43(7): 2845-2855. DOI: 10.5846/stxb202204221107.
- [38] 林友兴, 张一平, 费学海, 等. 云南不同森林生态系统蒸散特征的比较研究 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(1): 205-218. DOI: 10.7540/j.ynu.20170568.
- [39] 周三, 韩军丽, 赵可夫. 泌盐盐生植物研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2001(5): 496-501. DOI: 10.3321/j.issn:1006-687X.2001.05.020.
- [40] 雷金银, 班乃荣, 张永宏, 等. 柽柳对盐碱土养分与盐分的影响及其区化特征 [J]. *水土保持通报*, 2011, 31(2): 73-76. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2011.02.033.
- [41] 张道远, 尹林克, 潘伯荣. 柽柳泌盐腺结构、功能及分泌机制研究进展 [J]. *西北植物学报*, 2003, 23(1): 190-194. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4025.2003.01.035.
- [42] 张天举, 陈永金, 刘加珍, 等. 黄河三角洲柽柳灌丛对土壤盐分养分的影响 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(1): 70-74. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2019.01.016.
- [43] 徐存东, 王荣荣, 程慧, 等. 基于遥感数据分析干旱区人工绿洲灌区的水盐时空分异特征 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2): 80-89. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.011.
- [44] 沈浩, 吉力力·阿不都外力. 玛纳斯河流域农田土壤水盐空间分布特征及影响因素 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 769-776. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20141223.026.
- [45] 阎顺国, 沈禹颖, 朱兴运, 等. 河西走廊盐化草甸土壤水盐对植物群落数量特征的影响 [J]. *草业学报*, 1995(2): 37-43.
- [46] 郭嘉, 李敬玉, 徐化凌, 等. 6 种典型滨海湿地植物对土壤盐分的影响 [J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(3): 38-46. DOI: 10.15928/j.1674-3075.201906100148.
- [47] 宋颖, 高明秀, 徐贻欣, 等. 环渤海平原区土壤盐渍化反演与水盐耦合分析 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 315-324. DOI: 10.13870/j.cnki.stbctb.2023.06.040.
- [48] 柳菲, 陈沛源, 于海超, 等. 民勤绿洲不同土地利用类型下土壤水盐的空间分布特征分析 [J]. *干旱区地理*, 2020, 43(2): 406-414. DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2020.02.14.

Tamarix chinensis on soil water and salt and its coupling relationship in the Yellow River Delta wetland

CAO Jiixin¹, CHEN Yongjin¹, ZHU Haiyong³, LI Jiixin¹, WANG Xuting¹, XU Mengchen², LIU Jiazhen¹

(1. School of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. Jinan Environmental Research Institute, Jinan 250100, China; 3. Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: The Yellow River Delta, the most comprehensive and youngest coastal wetland in China, exhibited the dual characteristics of abundant resources and fragile ecological environment. The severe soil salinization and halophytes play a critical role in salinization control. *Tamarix chinensis* was a typical halophyte adjusting water salt balance. So, the aim of this paper was revealing the mechanisms of plants impact on soil water and salt in coastal wetlands and providing scientific reference for the protection and restoration of coastal wetlands.

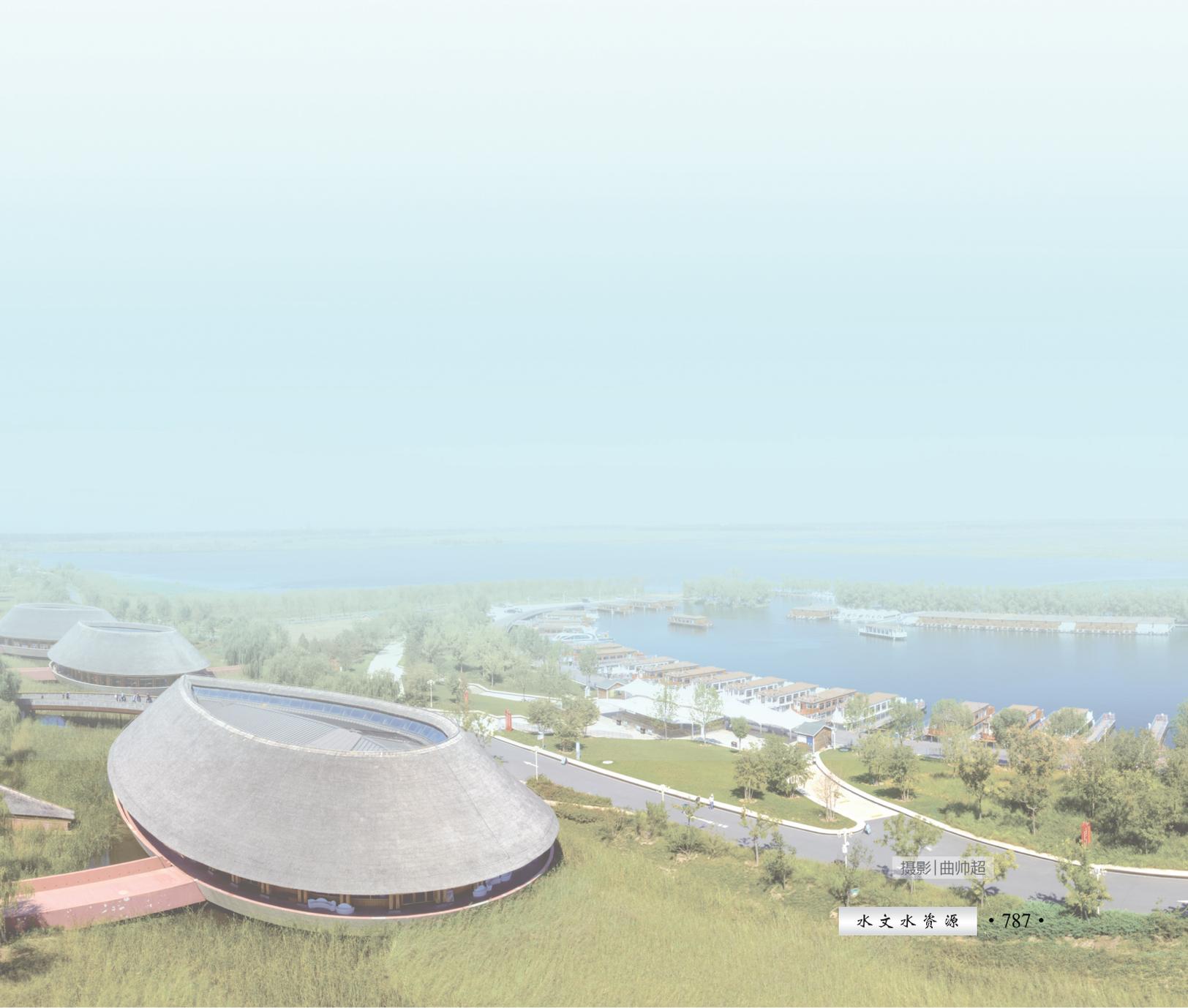
The study focused on soil water and salt around *Tamarix chinensis* Lour in the Yellow River Delta wetland. The sample collection location was selected on the buffer zone on the south side of the Yellow River Delta Nature Reserve, which were the *Tamarix* communities with minimal human interference. A relatively independent tamarisk shrub with vigorous growth was selected in the community. Four sets of soil profiles were successively taken from north, south, east and west, each set consists of 4 soil profiles which were able to represent the status of the soil distancing 50 cm, 100 cm, 150 cm, and 200 cm from the root of the shrub. Each soil profile was layered in layers of 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm and beneath 40 cm of the ground water level visible. the eight major ions (HCO_3^- 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) and moisture content in the soil were monitored.

To reveal the influenced mechanism of coastal wetland plants on soil water and salt, the spatiotemporal characteristics and coupling relationship of soil water and salt around the habitat of *Tamarix* shrub in the Yellow River Delta were analyzed. The results showed that: The soil moisture content under the plant crown was significantly higher than that of the edge of plant crown and the bare ground and showed a trend of gradual decreasing from main stem of the *Tamarix* to far away. The water aggregating rate showed a clear “water island”

pattern, in the soil layer above 20 cm, the accumulation rate under the plant crown was significantly higher than that of the crown edge, while the opposite was in the soil layer below 20 cm. Soil salt ions were well correlated with total salt, among which Cl^- , Na^+ and Mg^{2+} were significantly correlated, and the changes in the contents of three ions under the crown of tamarisk were relatively small in all directions of east, south, west and north. Due to the salt absorption by the root system of Chinese tamarisk, the enrichment rate of total salinity under the plant crown was less than that at the crown edge and showed a clear “salt valley” pattern.

The high coupling degree of soil water-salinity appeared in the states of high salt content and low moisture content around the *Tamarix* shrub. The high coupling situation occurred in the surface soil around the tamarisk, on the south and west two sides, and in the bare land far from the tamarisk. At different directions around the shrub, the coupling degree of soil water-salinity was manifested as west > south > north > east. The soil water and salinity content showed the significant negative correlation. Under the influence of the Chinese Tamarisk, the coupling degree of water and salt appeared a gradually decreasing trend from far to near the Tamarisk. As the increase of the soil depth, the influence of external factors gradually weakens, and the coupling degree decreased with the increase of soil depth.

Key words: the Yellow River Delta; *Tamarix chinensis*; analysis of water and salt; spatial variation; coupling relationship



摄影|曲帅超